

# 차량 진동이 궤도 선형 측정에 미치는 영향

## Influence of Vehicle Vibration on Track Geometry Measurement

배 규 영<sup>†</sup> · 용 재 철\* · 김 이 현\*\* · 권 삼 영\*\*

Kyu-Young Bae, Jae Chul Yong, Lee-Hyeon Kim and Sam-Young Kwon

(Received March 16, 2016 ; Revised September 22, 2016 ; Accepted September 22, 2016)

**Key Words :** Track Geometry(궤도선형), Track Irregularity(궤도틀림), Track Geometry Measuring System(궤도선형검측시스템), Vehicle Vibration(차량진동), Inertial Navigation System(관성항법장치)

### ABSTRACT

Track maintenance works based on track geometry recordings are essential to enhance the safety and comfort of railway transportation. Usually, the track irregularity has been measured by a special inspection trains which all were imported from abroad. Because the inspection train speed is limited under 160 km/h, it takes a long time to inspect railways and there is difficulty in daytime operation. To solve this problem, we started to develop a track geometry measuring system (TGMS) with measurement speed up to 300 km/h which can be installed in commercial vehicles such as HEMU-430X. In this paper, we introduce a newly developed inertial TGMS and propose two inertial navigation system (INS) algorithms (method A, B) for measuring track geometry. In order to investigate advantage and disadvantage of each algorithm, we performed vibration test of the TGMS, which was simulated by 6-axis shaking table. Through the vibration test, we analyzed the influence of vehicle vibration on the TGMS which will be installed on bogie frame. To the vibration test, two methods satisfied the required accuracy of track geometry measurement under the level of the actual vehicle vibration of HEMU-430X train. Theoretically, method A is sensitive to vehicle vibration than method B. However, HEMU-430X's bogie vibration frequency range is out of interest range of measurement system. Therefore, method A can also apply the HEMU-430X train.

## 1. 서 론

궤도 선형 검측을 기반으로 하는 궤도 유지보수는 철도 교통의 안전과 승객의 편안함을 증가시키기 위한 필수적인 부분이다. 특히 고속선에서 궤도틀림의 진행이 기존선의 궤도와 비교하여 현저하게 크며, 그로 인해 발생하는 열차동요가 차량의 주행 안정성 및 소음, 진동 등에 악영향을 미친다<sup>(1)</sup>.

Table 1에서와 같이 현재 전량 수입하여 운용되고 있는 검측차 및 궤도 검측 시스템은 운용 속도가 160 km/h 이하로 제한적이어서 검측에 오랜 시간이 소요되고 주간운행이 곤란한 한계가 있다. 이를 해결하기 위해서 철도 인프라의 유지보수를 위한 고속 종합검측 시스템을 독자적으로 개발하고자 하는 국가 R&D 프로젝트가 4년 기한으로 2013년 5월부터 시작되었고 그 일환으로 궤도 검측 시스템이 개발되고 있다<sup>(2)</sup>. 이는 고속철도뿐만 아니라 검측 요구가

† Corresponding Author; Member, FIBERPRO Inc.  
E-mail : kybae@fiberpro.com

\* FIBERPRO Inc.

\*\* Korea Railroad Research Institute

‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

증가하고 있는 도시철도에도 적용될 수 있도록 모듈화하여 개발되고 있다.

기존 연구에서 관성항법장치(inertial navigation system, INS)를 이용한 관성식 궤도선형 검측 시스템을 구성하여 궤도 계측이 가능함을 확인하였다<sup>(1)</sup>.

이 연구에서 새로 개발한 궤도틀림 검측 시제품을 트롤리에 장착해서 시험선로에서 성능시험을 진행 하였다<sup>(2)</sup>. 트롤리에 장착한 궤도틀림 검측 시제품의 경우에는 별도의 현가장치가 없이 윤축에 장비가 설치되어 있는 형태여서 궤도의 변화가 왜곡 없이 그대로 INS에 전달되기 때문에 궤도의 변화를 정확히 측정할 수 있었다.

하지만 이 시제품이 설치된 열차(HEMU-430X 예정의 경우에는 열차 하부 공간이 집적도가 높아 매우 협소하고, 윤축(wheelset)에 궤도 측정장비를 설치할 수 있는 별도의 측정 프레임의 구축하는 개조가 용이하지 않다. 따라서 궤도 측정장비를 윤축이 아닌 대차(bogie)에 설치할 수 밖에 없는 상황이다. 대차에 설치하게 되면 궤도의 변화가 그대로 INS에 전달되지 않고 현가장치 및 차량 진동 등에 의해서 왜곡될 수 있다. 정확한 궤도틀림을 측정하기 위해서는 궤도틀림 검측 시스템이 궤도의 변화와 이와 무관한 대차의 움직임을 구분하여 궤도 계측을 할 필요성이 있다.

이 논문에서는 고속열차의 대차에 설치되는 관성식 궤도틀림 검측 시스템이 주행 중에 발생하는 진동에 의해 어떠한 영향을 받는지 살펴보았다. 특히 차량 진동이 궤도틀림 측정의 정확도에 미치는 영향을 두 가지 검측 방식에 대해서 비교하였다.

## 2. 관성식 궤도틀림 검측 시스템

### 2.1 관성식 궤도틀림 검측 시스템 구성

관성항법장치와 레이저 센서를 이용한 비접촉 관성식 궤도틀림 검측 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. 관성식 측정법은 관성항법장치가 측정하는 가속도 및 각속도로부터 관성항법장치가 설치되어 있는 부분의 3차원 위치를 검출하고, 이로부터 레일까지의 거리를 레이저 센서로 측정하여 궤도틀림 검측 시스템이 설치된 열차가 궤도 위를 달리면서 궤도의 선형과 틀림을 계측하는 원리이다.

측정센서로부터 획득한 정보는 Fig. 2와 같은 데이터 처리를 통해 궤도 선형정보로 계산하게 된다. 측정 장치가 설치되어 있는 측정 프레임의 3차원 움직임을 INS 내의 센서들의 신호를 가공하여 측정하며, 측정 장비와 레일간의 상대적인 거리 변화를 레이저 센서로 측정하여 궤도 선형 및 틀림을 측정하게 된다.

### 2.2 궤도 선형 측정 방식

관성항법장치를 이용하여 선로의 위치 정보를 획득하는 방식에는 2가지 방법을 생각해 볼 수 있다. 하나는 관성항법장치에서 출력되는 위치 정보를 직접적으로 사용하는 방법(method A)과 다른 하나는 관성항법장치의 자세(attitude)를 사용하여 간접적으로 위치 정보를 획득하는 방법(method B)이다.

관성항법장치는 지구상에서 항법장치 자신의 3차원 위치 및 자세 정보를 출력하며, 선로를 위치를 추정하는 데는 method A의 경우 자세와 위치 정보를 모두 사용하고 method B의 경우 자세 정보만을 사용하게 된다.

일반적인 관성항법장치의 위치 및 자세 오차 값은 시간이 경과에 따라 다른 경향을 보이며 추가의 보정수단이 없는 경우 위치오차는 Fig. 3과 같이 시간에 따라 발산하게 된다. 위치오차는 측정 시작 지점의 초기 위치 및 속도, 자세 등에 의해 발생하는 초기 오차(initial error)와 가속도 센서와 각속도 센서로 인한 오차가 누적되면서 발생하게 되고 오차의 크기가 수 km까지도 증가하기 밀리미터 수준의 오차를 갖는 궤도 검측 시스템에 바로 적용하기에 부적합하다.

Table 1 Characteristics of inspection systems

Subject	Roger-1000K	EM140K	TGMS (under development)
Measurement method	Optical / versine system	Optical / inertial system	Optical / inertial system
Max speed	160 km/h	140 km/h	300 km/h
Measuring speed	0 km/h ~ 200 km/h	5 km/h ~ 300 km/h	15 km/h ~ 300 km/h
Standard	EN-13848-1	EN-13848-1	EN-13848-1

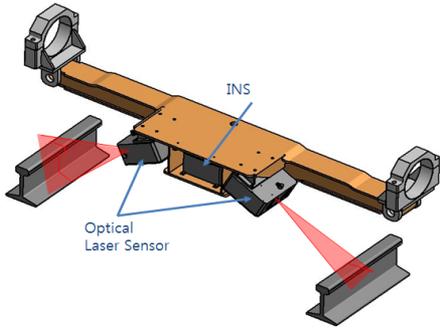


Fig. 1 Inertial track geometry measuring system

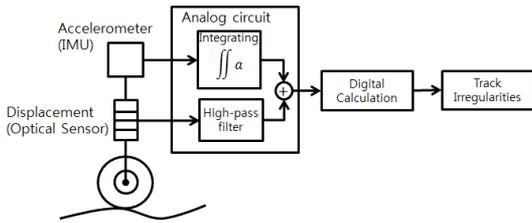


Fig. 2 Principle of inertial measuring method

반면에 각속도계의 센서 오차에 의해 발생하는 각도 오차는 Fig. 4와 같이 시간에 따라 일정 주기를 반복하는 형태를 갖는다. 각도 오차에 의해 직접적으로 발생 되는 궤도 파라미터의 오차 범위가 0.1 mm 이하로 작기 때문에 위치 오차와 달리 추가 보정 수단 없이 궤도 검측에 바로 사용될 수 있다<sup>(3)</sup>.

일반적으로 위치 데이터를 취득하는 간단한 방법은 식 (1)과 같이 가속도를 이중 적분하여 얻는다.

$$\begin{aligned}
 x(t) &= x_0 + \int \int_{t_0}^{t_s} a_x(t) dt^2 \\
 y(t) &= y_0 + \int \int_{t_0}^{t_s} a_y(t) dt^2 \\
 z(t) &= z_0 + \int \int_{t_0}^{t_s} a_z(t) dt^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서,  $x, y, z$ 는 3차원 공간상의 위치 좌표이며  $t$ 는 주행시간,  $a_x, a_y, a_z$ 는 각 축 방향 가속도이다. 위의 방식으로 궤도 검측에서 요구되는 수준의 오차 범위 안에 들기 위해서는 정교한 GPS와 주행거리계의 도움을 받아 보정을 받아야 한다<sup>(4)</sup>.

Method A는 식 (1)을 이용해서 계산된 INS의 위도, 경도, 고도와 같은 위치 데이터를 바로 사용한다. 이 방식은 INS가 설치된 측정 프레임의 위치

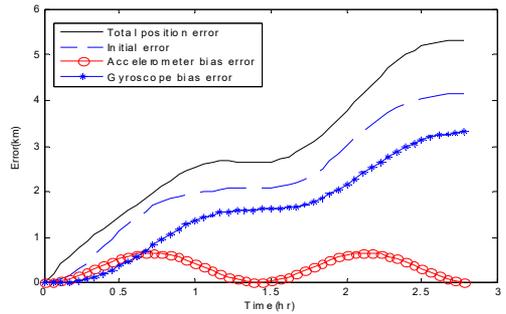


Fig. 3 INS position error propagation

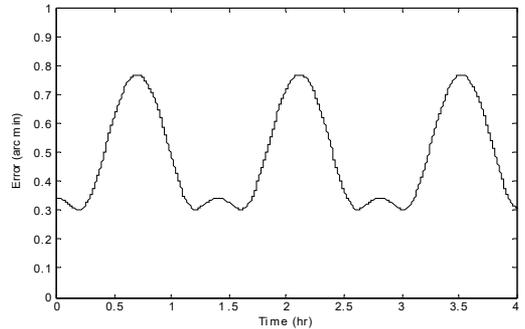


Fig. 4 INS angle error propagation

변화를 직접적으로 알 수 있어 궤도 변화에 무관한 차량 진동에 의한 움직임까지 측정할 수 있는 장점이 있다.

반면에 관성항법장치 자체의 위치 오차가 궤도 선형 측정에 직접적인 오차로 작용하기 때문에 오차를 줄이기 위해서 고성능의 INS와 GPS, 주행거리계 등의 추가 보정수단으로 시스템이 구성되어야 한다. 이러한 구성에도 불구하고 GPS 신호를 사용할 수 없는 터널, 지하 구간 등이 많은 선로를 검측할 때에는 보정 수단이 작동하지 않기 때문에 오차가 커지게 된다<sup>(5)</sup>.

관성항법장치의 위치 정보 대신에 자세를 이용하여 간접적으로 위치 데이터를 취득하는 방법(method B)도 있으며 식 (2)와 같은 방식으로 위치를 구하게 된다.

$$\begin{aligned}
 x(s) &= x_0 + \int_{s_0}^s \cos(\psi(s)) \cos(\theta(s)) ds \\
 y(s) &= y_0 + \int_{s_0}^s \sin(\psi(s)) \cos(\theta(s)) ds \\
 z(s) &= z_0 + \int_{s_0}^s \sin(\theta(s)) ds
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서,  $x, y, z$ 는 3차원 공간상의 위치 좌표이며  $s$ 는 주행거리,  $\psi$ 는 요(yaw)각도,  $\theta$ 는 피치(pitch)각도이다.

식 (2)와 같은 계산방식은 3차원 공간상에서 윤축의 움직임을 계산하는 일반적인 방법으로서, 양쪽 선로의 변화와 관련 없는 차량 진동이 발생하지 않는다는 가정 하에 적용될 수 있는 모델이다<sup>(6)</sup>. 하지만 이 방식은 Fig. 4처럼 각도 오차가 작기 때문에 계산되는 위치 오차가 작은 장점이 있다.

특히 열차의 경우에는 비행기나 로켓과 달리 궤도를 따라 주행하기 때문에 각도 변화 없이 위치 변화가 생기지 않기 때문에 이 방식을 사용하기에 적합하다.

트롤리에 설치한 시제품의 경우 method B처럼 간접적으로 선로의 선형 정보를 취득하여 궤도틀림을 측정하였으며 EN13848 규격에서 요구하는 오차 범위 안의 측정 반복도를 갖는 결과를 얻었다<sup>(2,7)</sup>.

실제 적용될 궤도틀림 검측 시스템의 장착 위치는 윤축이 아닌 대차 부분이므로 시제품에서는 고려하지 않았던 대차 거동이 발생 할 수 있다. 이러한 대차 거동이 궤도틀림 검측에 어떠한 영향을 미치는지 실험을 통해 알아보고 두 가지 궤도 선형 검측 방식에 대한 평가를 진행하였다.

### 3. 열차진동 모사시험

진동시험은 Fig. 5와 같은 6자유도 진동대를 이용해서 하였다. 궤도틀림 검측 시스템을 진동대와 연결된 프레임에 설치하여 진동이 가해지도록 하였고 궤도 모형은 진동대 외부에 고정하여 움직이지 않도록 하였다.

개발된 궤도틀림 검측 시스템은 주행거리계의 주행 정보와 GPS의 위치 정보가 있어야 정상적으로 작동하기 때문에 궤도 모형에 장착되어 있는 주행거리계 주행 정보 및 GPS 위성 신호가 관성항법장치로 들어오게 하였다.

궤도 검측 시스템이 설치될 HEMU-430X 차량이 직선형태의 고속선로를 다양한 속도(0 km/h ~ 300 km/h)로 주행하면서 측정된 횡 방향 및 수직 방향 진동(Fig. 6)을 기준으로 진동대에 인가할 진동의 형태를 정하였다. 이러한 열차의 진동은 차체의 고유 진동, 대지진동, 현가장치 작용과 같은 요인에 의해

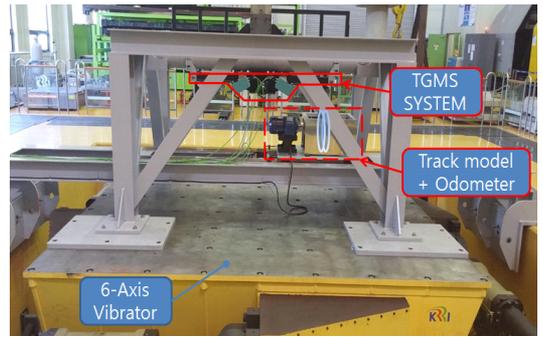


Fig. 5 Vibration test setup

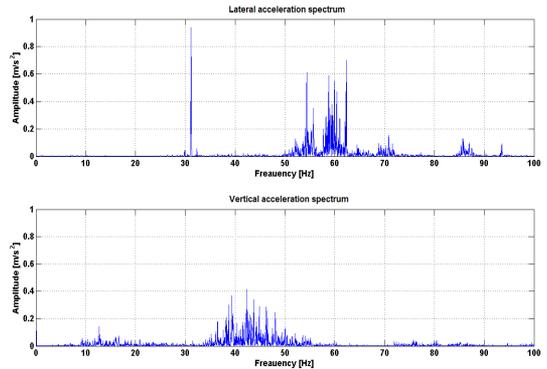


Fig. 6 Lateral and vertical acceleration spectrum of HEMU-430X bogie

Table 2 Characteristics of applied vibration

Axis	No.	Frequency (Hz)	Acceleration peak(g)
Y (lateral axis)	Y1	6.03	2.20
	Y2	31.25	0.13
	Y3	54	0.09
	Y4	60	0.08
Z (vertical axis)	Z1	7.6	3.50
	Z2	42	0.06

발생되며, 특히 주행 속도가 빨라질수록 공력에 의한 차체 진동도 주요한 요인이 된다<sup>(8)</sup>.

Fig. 6의 진동 스펙트럼에서 진폭이 큰 주파수 대역(Y2 ~ Y4, Z2)과 사행동 발생시의 경험적으로 알고 있는 6 Hz ~ 8 Hz의 주파수 대역(Y1, Z1)을 Table 2와 같이 선정하여 진동 시뮬레이션 시험을 수행하였다.

외부에 별도로 설치한 변위센서로 실제 가해진

진동을 측정하여 레이저 센서 및 INS의 변위 데이터와 교차 확인할 수 있도록 실험을 진행했다.

### 4. 시험 결과

#### 4.1 반복성 시험

각각의 가진 조건에 대해 3번씩 반복 시험을 실시하였으며, Y3 가진 조건에서의 횡 방향 변위를 레이저 센서로 측정한 결과는 Fig. 7과 같다.

5초와 50초 부근의 큰 변화는 진동대가 진동을 인가 및 중지할 때의 자체적인 움직임이며, 실제 Y3 진동 구간은 10초부터 40초 사이이다. 3번의 반복 시험간의 차이가 0.2 mm 이하로 진동이 동일하게 가해짐을 확인하였다.

Method A(Fig. 8)에서는 10초부터 40초 사이의 Y3 진동에 해당하는 움직임이 관찰되고, 레이저 센서로 측정된 횡 방향 변위(Fig. 7)와 동일하다. Method B

(Fig. 9)에서는 해당 움직임을 볼 수 없는데 그 이유는 각도 변화 없는 위치 변화가 진동에 의해 생겼기 때문이다.

#### 4.2 차체 진동이 궤도틀림 측정에 미치는 영향

진폭이 작은 Y2~Y4, Z2 진동에 의해 발생하는 축 방향 변위는 0.5 mm 이하이며, 이러한 변위는 궤도틀림 측정에서 요구하는 오차 범위 이내이다. 또한 궤도틀림을 측정하는 파장의 범위는 3 m~200 m이며, 최고 측정 속도 300 km/h로 측정하여도 이 범위에서의 최대 주파수는 28 Hz를 넘지 않는다. 따라서 관심 파장대역필터를 측정 결과에 적용하면 위 네 진동 모두 최대 주파수 밖이므로 두 방식 모두의 궤도틀림 계산에 영향을 미치지 못하게 된다.

때문에 진폭이 크며 낮은 진동 주파수를 갖는 Y1 진동시험이 궤도 검측 방식에 따른 진동 영향을 확인할 수 있는 시험이다.

Y1 가진 조건에 의한 실험 결과가 Fig. 10과 같이 나오게 되었으며, 레이저 센서로 측정된 횡 방향 변위(파란색, —)와 궤도틀림 검측 시스템이 위치를 계산하는 method A(붉은색, ×)와 B(검은색, ○)를 이용한 변위를 같이 그래프에 나타내었다.

Y3 시험과 유사하게 진동 인가 및 중지 부분에서 큰 자체 움직임이 있으며, 7초에서 22사이에 실질적인 Y1 가진이 있다. 가진 Y1에 의해 발생된 횡 방향의 진폭은 12.5 mm이다.

진동 인가(4초) 및 중지(27초) 부분에서 레이저 센서의 측정값과 method A를 이용한 결과가 다른 이유는 INS에 누적되는 위치오차를 제거하기 위해

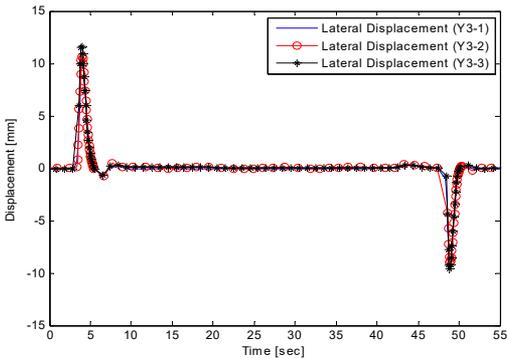


Fig. 7 Lateral displacement - Y3 vibration

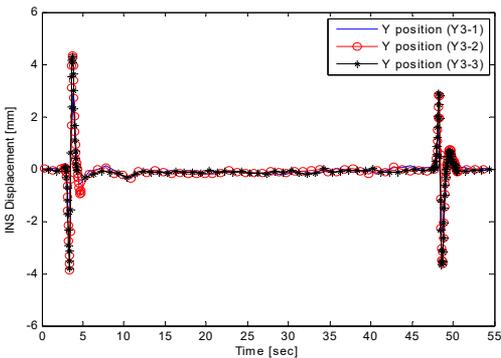


Fig. 8 Lateral displacement calculated by method 1 - Y3 vibration

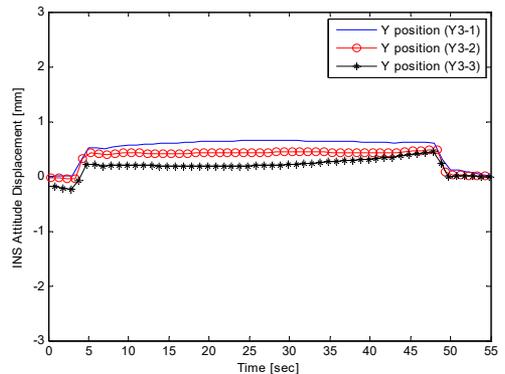


Fig. 9 Lateral displacement calculated by method 2 - Y3 vibration

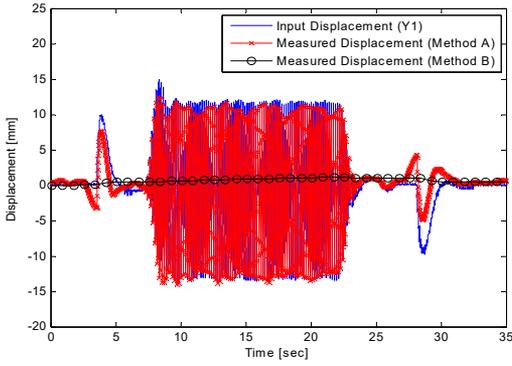


Fig. 10 Lateral displacement - Y1

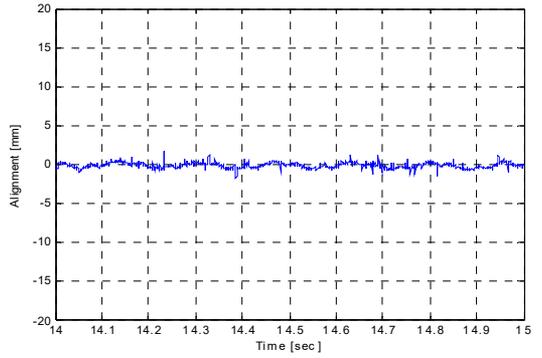


Fig. 12 Track alignment (method 1) - Y1

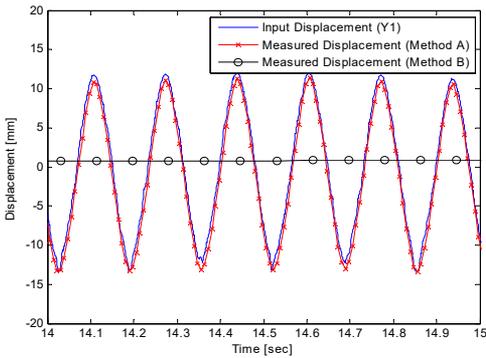


Fig. 11 Lateral displacement (14 s ~ 15 s) - Y1

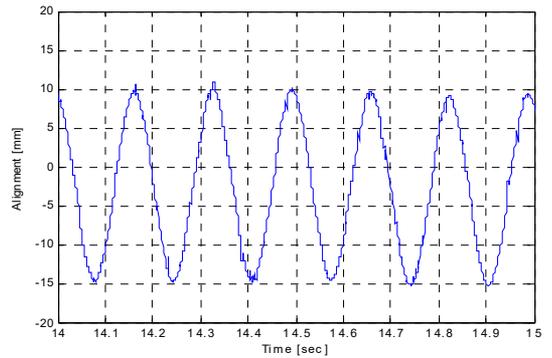


Fig. 13 Track alignment (method 2) - Y1

상대적인 변위를 얻어내는 과정에서 생기는 차이 때문이다.

의도된 진동이 인가되는 부분(Fig. 11)에서는 레이저 센서의 측정과 Method A로 계산된 변위가 각 센서의 오차 범위 안에서 일치하였다.

반면 Method B로 계산된 변위는 진동을 감지하지 못하고 진동에 의해서 변위가 거의 변하지 않는 것으로 인식하게 된다. 이는 각도 변화없는 위치 변화가 진동에 의해 생겼기 때문이다.

위의 두 방식으로 얻어진 궤도 선형 결과를 이용하여 계산된 궤도틀림(방향틀림)을 Figs. 12, 13에 나타내었다. 외부에 고정되어 움직임이 없는 궤도 모형의 방향틀림(alignment)은 진동과 관계없이 변화가 없어야 한다.

Method A로 계산된 방향틀림(Fig. 12)은 진동에 의한 횡 방향 변위를 INS가 측정하여 측정 프레임의 위치 변화를 보정하기 때문에 방향틀림의 변화가 생기지 않게 된다.

반면에 method B로 계산된 방향틀림(Fig. 13)은 궤도변화와 무관한 진동에 의한 횡 방향 변위를 INS가 측정하지 않기 때문에 방향틀림의 변화가 생기게 된다. 여기서 강조하고 싶은 점은 Y1은 실제 차량에서 발생하는 진동보다 20배 이상 과장한 것이다. 실제 HEMU-430X 차량의 진동은 그 크기가 Fig. 6에서처럼 가속도의 진폭이  $1 \text{ m/s}^2$  이하로 작기 때문에 method B로도 궤도틀림 규격에서 요구하는 정확성을 만족할 것으로 보인다. 또한 진폭이 큰 진동 주파수 대역이 30 Hz 이상이기 때문에 과장대역 필터가 적용되면 그 영향을 무시할 수 있을 것이다.

### 5. 결론

개발된 궤도틀림 검측 시스템이 대차에 장착될 때 궤도의 변화와 무관한 차체 진동이 궤도틀림 측정에 어떠한 영향을 미치는지 진동 시험을 통해 확인하였다.

이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가속도 정보를 이용하여 위치를 구하는 방법 (method A)으로 차량 진동에 상관없이 궤도 측정에서 요구하는 오차범위 이내로 궤도틀림을 측정할 수 있다. 하지만 터널 구간과 같이 보정수단이 제대로 작용하기 힘든 선로에서는 INS의 위치 오차 누적으로 정확도에 문제가 발생할 수 있다.

(2) Method B에서는 INS 위치 오차 누적이 작은 장점이 있으나, 각도 변화 없는 측 방향의 차량 진동에 의해 측정 결과가 영향을 받기 때문에 궤도틀림 측정 정확도에 문제가 될 수 있다.

(3) 차량 진동에 의한 영향을 배제할 수 있는 운측에 궤도틀림 검측 시스템을 설치할 수 있는 경우에는 method A보다 method B를 적용하는 것이 효율적이다.

(4) 차량 진동에 의한 영향을 배제할 수 없는 대차에 궤도틀림 검측 시스템을 설치할 경우에는 method A를 적용하는 것이 바람직하다. 하지만 이 시제품이 설치될 HEMU-430X의 차량 진동 수준에서는 method B를 적용하여도 궤도 측정에서 요구하는 정확도로 측정할 수 있다. 하지만, 관심 과장영역에서 발생하는 차량 진동이 있는 대차의 경우에는 method B는 궤도틀림 측정의 신뢰성이 떨어진다.

향후 개발된 궤도틀림 검측 시스템을 검측차에 설치하여 method A, B를 모두 실제 주행 측정으로 검증할 계획이다. 그 검증 결과를 토대로 현차시험에 적합한 방식을 채택하여 고도화 할 필요가 있다.

## 후 기

이 논문은 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 철도기술개발사업 “고속 궤도 검측 모듈 개발”에서 수행된 내용입니다.

## References

(1) Kim, S.-S. and Park, C.-S., 2008, High Speed

Rail Measurement System of HSR-350x, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 2, pp. 115~119.

(2) Bae, K.-Y., Yong, J. C., Hwang, J. M., Kwon, S. Y., Kwon, S.-Y. and Choi, I. Y., 2015, Development and Test of a Track Geometry Measurement Prototype, Proceedings of the Korea Society for Urban Railway Annual Spring Conference, pp. 393~396.

(3) Titterton, D. and Weston, J., 2004, Strapdown Inertial Navigation Technology, The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2nd Edition.

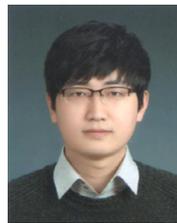
(4) Lück, T. and Ch. Kreye, B. E., 2001, Measurement of Line Characteristics and of Track Irregularities by Means of DGPS and INS, International Symposium on Kinematic System in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Alverta, Canada.

(5) Kreye, C., Eissfeller, B. and Ameres, G., 2004, Architectures of GNSS/INS Integrations: Theoretical Approach and Practical Tests, In Symposium on Gyro Technology, pp. 14.0~14.16.

(6) Shabana, A. A., Zaazaa, K. E. and Sugiyama, H., 2007, Railroad Vehicle Dynamics: A Computational Approach, CRC Press.

(7) British Standard, 2008, Railway Applications - Track-track Geometry Quality, BS EN 13848.

(8) Choi, J. H., Park, T. W., Sim, K. S., Kwak, M. H. and Lee, D. H., 2012, Stability Evaluation on Aerodynamics of High Speed Railway Train, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 244~252.



**Kyu-Young Bae** is a research engineer at FIBERPRO Lab, FIBERPRO Inc. He received M.S. degree from Chungnam National University. His research interest include mechanical system design to reduce noise and vibration.